

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 11-023796

(43)Date of publication of application : 29.01.1999

(51)Int.Cl.

G21K 1/06
B32B 7/02

(21)Application number : 09-183594

(71)Applicant : NIKON CORP

(22)Date of filing : 09.07.1997

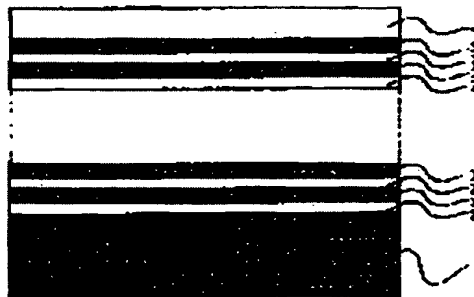
(72)Inventor : ISHIYAMA WAKANA

(54) MULTILAYER-FILM X-RAY REFLECTOR

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To obtain a reflector that does not reflect a He bright-line spectrum (He II) in a soft X-ray region by optimizing the thickness of the uppermost layer in a laminated layer so as to reduce the reflectance to the light with a specific wavelength.

SOLUTION: By using the uppermost layer of a multilayer film as a singlelayer film to optimize the thickness of the layer, 30.4 nm can be an inverse peak wavelength. In other words, a multilayer film that does not reflect an He bright-line spectrum (He II) with a wavelength of 30.4 nm can be obtained in a soft X-ray range. In order to increase reflectance and wavelength resolution, the combination of substances with little absorptivity is adopted so as not to saturate reflectance even if many layers are laminated. Synthetic quartz polished to a mirror smooth state is used for a substrate 1, and Mo layers 2 and Si layers 3 are alternately laminated over and over again on the substrate 1 by ion beam sputtering to form a multilayer film. It is determined that the first layer on the substrate 1 be Mo and the second layer Si, and the cycle length of the multilayer film is set at 6.7 nm, the ratio of layer pressure at 0.15 and the number of laminated layers at 149.5 pairs. On these layers, the film of the Si layer 4 is formed by 14.2 nm.



(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平11-23796

(43)公開日 平成11年(1999)1月29日

(51)Int.Cl. ⁵	識別記号	F I
G 2 1 K 1/06		G 2 1 K 1/06 C
B 3 2 B 7/02	1 0 3	B 3 2 B 7/02 1 0 3

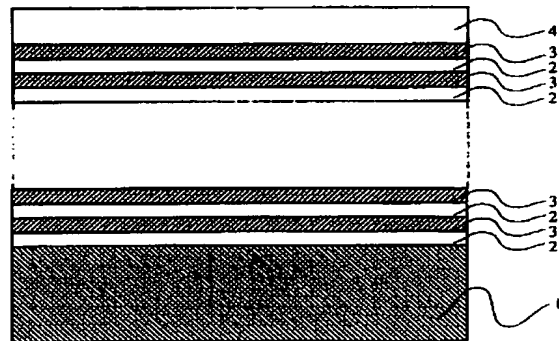
審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 6 頁)	
(21)出願番号	特願平9-183594
(22)出願日	平成9年(1997)7月9日
(71)出願人	000004112 株式会社ニコン 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号
(72)発明者	石山 若葉 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(54) 【発明の名称】 多層膜X線反射鏡

(57) 【要約】

【課題】 軟X線領域において波長30.4nmのHe II輝線スペクトル(He II)を反射しない多層膜X線反射鏡を提供すること。

【解決手段】 軟X線領域における屈折率と真空の屈折率との差が大きい物質からなる第1層2と、前記差が小さい物質からなる第2層3とを基板1上に交互に繰り返して積層してなる多層膜X線反射鏡において、前記積層における最上層4の厚さを波長30.4 nmの光に対する反射率を低減させる様に最適化したことを特徴とする多層膜X線反射鏡。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 軟 X 線領域における屈折率と真空の屈折率との差が大きい物質からなる第 1 層と、前記差が小さい物質からなる第 2 層とを基板上に交互に繰り返し積層してなる多層膜 X 線反射鏡において、前記積層における最上層の厚さを波長 30.4 nm の光に対する反射率を低減させる様に最適化したことを特徴とする多層膜 X 線反射鏡。

【請求項 2】 前記最上層を前記多層膜の構成物質のうち吸収の小さい物質からなる層としたことを特徴とする請求項 1 記載の多層膜 X 線反射鏡。

【請求項 3】 前記積層の回数を反射率が飽和する値にしたことを特徴とする請求項 1 または 2 記載の多層膜 X 線反射鏡。

【請求項 4】 前記第 1 層と前記第 2 層を 1 層ずつ積層した積層体の層厚に相当する前記積層の周期長、及び前記第 1 層と前記周期長との層厚比 (Γ) を反射率の中心波長が 13.28nm (または略 13.28nm)、17.11nm (または略 17.11nm)、18.04nm (または略 18.04nm)、21.13nm (または略 21.13nm) になる値の組み合わせにしたことを特徴とする請求項 1～3 記載の多層膜 X 線反射鏡。

【請求項 5】 前記屈折率の差が小さい物質として Si または Si 化合物を用い、前記屈折率の差が大きい物質として Mo または Mo 化合物を用いたことを特徴とする請求項 1～4 記載の多層膜 X 線反射鏡。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、軟 X 線領域で用いられる多層膜反射鏡、特に太陽観測を行うための X 線望遠鏡に用いて好適な多層膜 X 線反射鏡に関するものである。

【0002】

【従来の技術】X 線領域における物質の複素屈折率は、 $n = 1 - \delta - i k$ (δ 、 k : 実数、 k は X 線の吸収を示す) で表され、 δ 、 k とも 1 に比べて非常に小さい。そのため、X 線領域では可視光領域のような屈折を利用したレンズは利用できない。そこで、反射を利用した光学系が用いられる。

【0003】しかし、全反射臨界角 θ_c (波長 10nm で 20° 程度以下) よりも垂直に近い入射角では、反射率が非常に小さいので、界面の振幅反射率になるべく高い物質の組み合わせを何層も積層することにより、反射面を多数 (例えば数百層も) 設けて、それぞれの反射波の位相が合うように、光学干渉理論に基づいて各層の厚さを調整した多層膜 X 線反射鏡が用いられる。

【0004】より具体的に説明すれば、多層膜 X 線反射鏡は使用する X 線波長における屈折率と真空の屈折率 ($= 1$) との差が大きい物質層 (第 1 層) と、差の小さい物質層 (第 2 層) とを交互に多数積層することによ

て得られる。その代表例として、W (タングステン) / C (炭素)、Mo (モリブデン) / Si (シリコン) などの組み合わせが従来から知られており、スパッタリング、真空蒸着、CVD (Chemical Vapor Deposition) などの薄膜形成技術により形成されている。

【0005】多層膜 X 線反射鏡は、X 線を垂直に反射することも可能なので、全反射を利用した斜入射光学系よりも収差の小さい光学系を構成することができる。また、多層膜 X 線反射鏡はブラッグの式: $2 d \sin \theta = m \lambda$ (d : 多層膜の周期長、 θ : 斜入射角、 λ : X 線の波長、 m : 正の整数) を満たすときのみ X 線を強く反射するので波長選択性を有する。なお、 d は前記屈折率の差が小さい物質層と大きい物質層を各 1 層ずつ積層した積層体の層厚 (膜厚) に相当する。

【0006】近年、X 線望遠鏡を宇宙空間に設置して天体の X 線像を観測する、いわゆる X 線天文学分野の研究が盛んに行われるようになった。我国でも、これまでに「ようこう」、「あすか」と名付けられた人工衛星に X 線望遠鏡が搭載され、太陽等の天体からの X 線観測が行われている。しかし、これらの人工衛星に搭載された X 線望遠鏡は、全反射を利用した斜入射光学系によるものであり、斜入射光学系には波長選択性がないことと、収差が大きいために解像力が悪いという問題点があった。

【0007】例えば、太陽フレアで生成される高温プラズマやコロナの観測においては、ある特定の温度領域の画像を得ることが望まれており、そのために多層膜 X 線反射鏡を用いた X 線望遠鏡が開発されつつある。観測対象の温度は、そこから発生する X 線の波長により知ることができるので、多層膜光学系により特定波長の X 線のみの画像を観測すれば、特定の温度分布のみを抽出して観測することができることになる。

【0008】具体的には、鉄の輝線スペクトルの 13.28nm (Fe XXIII)、17.11nm (Fe IX)、18.04nm (Fe XI)、21.13nm (Fe XIV) の波長が重要である。これらの波長はそれぞれ 11.2、0.93、1.29、1.78MK の温度に相当する。一般に、多層膜 X 線反射鏡は、ピーク波長において数～数十% の反射率、ピーク波長近傍以外では 0.1～1% 程度の反射率である。ここで、ピーク波長とそれ以外の波長とのコントラストは、少なくとも $1/10 \sim 1/100$ 程度となる。

【0009】多層膜 X 線反射鏡を用いる際に使われる光源には、シンクロトロン放射光 (SR 光) やレーザープラズマ X 線源 (LPX) などがある。SR 光は白色光源であるが、多層膜鏡の上流側に分光器を置いて、所望波長の光のみを取り出して用いることができる。LPX など、元素の特性 X 線を利用した光源では、所望波長の光のみが得られる。これらの光源を用いる際には、所望波長の光のみをとりだすことができるため、ピーク波長以外の波長の光は反射光中に混入することはない。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】しかし、X線望遠鏡で太陽を観察する場合には、太陽スペクトル中に多数存在する輝線スペクトルが問題となる。観測波長は、比較的強度が高い輝線スペクトルの中から選択されるが、観測波長以外にも強度の高い輝線スペクトルが存在する。

【0011】そこで、観測波長以外の波長が反射光中へ混入するのを防ぐためには、高い波長分解能の多層膜が望ましい。ここで、波長分解能とは、波長に対する反射率のカーブを描いた際のピーク波長を λ 、ピークの半値幅を $\Delta\lambda$ として、 $\lambda/\Delta\lambda$ で定義される値である。しかし、多層膜の波長分解能を向上させる上で使用できる材料には、屈折率、吸収による制限があるので、多層膜だけで他波長の混入を防ぐことはできない。

【0012】そして、これらの輝線スペクトルが観測輝線スペクトルよりも短波長側にある場合には、フィルターにより取り除くことが容易であるが、長波長側にある場合には困難であり、問題点となっている。とりわけ、He II の輝線スペクトル (30.4nm) は、非常にスペクトル強度が高く、例えば21.13nm (Fe XIV) の強度に対して、30.4nm (He II) はおよそ50倍である。

【0013】このHe II の輝線スペクトル (30.4nm) は、観測波長よりも長波長側であるためフィルターは使用できず、反射光中に30.4nmの波長が混入する。このため、太陽スペクトルの観察が正確に行えなくなるという問題点があった。本発明は、かかる問題点を鑑みてなされたものであり、軟X線領域において波長30.4nmのHe II 輝線スペクトル (He II) を反射しない多層膜X線反射鏡を提供することを目的とする。

【0014】

【課題を解決するための手段】そのため、本発明は第一に「軟X線領域における屈折率と真空の屈折率との差が大きい物質からなる第1層と、前記差が小さい物質からなる第2層とを基板上に交互に繰り返し積層してなる多層膜X線反射鏡において、前記積層における最上層の厚さを波長30.4 nm の光に対する反射率を低減させる様に最適化したことを特徴とする多層膜X線反射鏡 (請求項1) を提供する。

【0015】また、本発明は第二に「前記最上層を前記多層膜の構成物質のうち吸収の小さい物質からなる層としたことを特徴とする請求項1記載の多層膜X線反射鏡 (請求項2) 」を提供する。また、本発明は第三に「前記積層の回数を反射率が飽和する値にしたことを特徴とする請求項1または2記載の多層膜X線反射鏡 (請求項3) 」を提供する。

【0016】また、本発明は第四に「前記第1層と前記

$$r = (n_2 - n_1) / (n_2 + n_1)$$

$$= \{ (\delta_1 - \delta_2 + i(k_1 - k_2)) \} / \{ (\delta_1 + \delta_2 + i(k_1 + k_2)) \}$$

ここではkの小さい物質 (吸収が小さい物質) を用いるので、 $\delta \gg k$ となり、前式は次式のように近似することができる。

第2層を1層ずつ積層した積層体の層厚に相当する前記積層の周期長、及び前記第1層と前記周期長との層厚比 (Γ) を反射率の中心波長が13.28nm (または略13.28nm)、17.11nm (または略17.11nm)、18.04nm (または略18.04nm)、21.13nm (または略21.13nm) になる値の組み合わせにしたことを特徴とする請求項1～3記載の多層膜X線反射鏡 (請求項4) 」を提供する。

【0017】また、本発明は第五に「前記屈折率の差が小さい物質としてSiまたはSi化合物を用い、前記屈折率の差が大きい物質としてMoまたはMo化合物を用いたことを特徴とする請求項1～4記載の多層膜X線反射鏡 (請求項5) 」を提供する。

【0018】

【発明の実施の形態】多層膜X線反射鏡は、高屈折物質から成る層と低屈折物質から成る層を基板上に交互に繰り返し積層し、これらの界面における反射光の位相をそろえることにより、所望波長で高反射率を得るものである。そして、この多層膜の上にさらに単層膜を付加すると、単層膜による反射光とその下の多層膜の反射光との干渉により分光反射率が変化する。

【0019】ここで、付加した単層膜の屈折率と層厚を適宜選択すれば、反射率を抑えたい波長 (以下逆ピーク波長と称す) における反射率を低くすることができる。従って、本発明 (請求項1～5) のように、多層膜の最上層を単層膜として用いて、その層厚を最適化すれば、30.4nmを逆ピーク波長とすることができる。即ち、本発明 (請求項1～5) によれば、軟X線領域において波長30.4nmのHe II 輝線スペクトル (He II) を反射しない多層膜X線反射鏡を提供することができる。

【0020】多層膜X線反射鏡の反射率と波長分解能を高めるためには、使用する多層膜材料の選択が重要である。多層膜の波長分解能は、反射率が飽和するまでは多層膜の積層回数 (積層数) に比例して増加する。そのため、これを高めるためには、多数の層を積層しても反射率が飽和しないように、吸収の小さい物質の組み合わせを用いるのがよい。

【0021】即ち、多層膜の波長分解能を高めるためには、複素屈折率 $n = 1 - \delta - i k$ の虚部k (物質の吸収の大きさを表す量) の値が小さい物質を用いるのがよい。一方、高い反射率の多層膜を得るためには、各界面での反射率が高くなるような材料を用いるのがよい。垂直入射の場合における多層膜界面での振幅反射率rは、フレネルの式より、多層膜を構成する二つの物質の屈折率をそれぞれ n_1 、 n_2 として、次式で与えられる。

【0022】

$$r = (\delta_1 - \delta_2) / (\delta_1 + \delta_2)$$

従って、多層膜界面での反射率を高くするためには、 δ の差の大きい物質の組み合わせを用いるのがよい。

【0023】そして多層膜を製作する際に、最上層は各層を構成する物質のうち吸収の小さい物質を配置すると、多層膜X線反射鏡のピーク反射率の低下が起りにくいので好ましい（請求項2）。また、多層膜X線反射鏡の反射率と波長分解能の両方を高めるために、反射率の値が飽和するまで積層回数を多くすることが好ましい（請求項3）。

【0024】さらに、多層膜X線反射鏡の反射率の中心波長が13.28nm（または略13.28nm）、17.11nm（または略17.11nm）、18.04nm（または略18.04nm）、21.13nm（または略21.13nm）となるように、積層の周期長と Γ （第1層の厚さ/周期長）の組み合わせを選択することが好ましい（請求項4）。また、前記2条件（ k が小さい物質、 δ の差の大きい物質）の組み合わせを考慮して、多数の物質の組み合わせを検討した結果、「前記屈折率の差が小さい物質/前記屈折率の差が大きい物質」の組み合わせとして、Si（またはSi化合物）とMo（またはMo化合物）の組み合わせが軟X線領域において、特に波長21.13nmの鉄の輝線スペクトル(Fe XI V)に対して、高い反射率と波長分解能を有することが分かった（請求項5）。

【0025】そして、この中でも後記の実施例にかかる組み合わせが特に好ましいことが分かった。本発明にかかる組み合わせのMo/Si（周期長11.0nm、 $\Gamma=0.2$ 、60ペア）の分光反射率（R）を図5示す。ピーク反射率は最上層厚にかかわらず、31%、波長分解能は29である。

【0026】通常多層膜では30.4nm近傍で反射率は0.4%程度であるが、最上層厚を最適化したものは、0.007%以下となり、ピーク波長（=21.13nm）反射率とのコントラスト（=30.4nmの反射率/21.13nmの反射率。以下、除去比という）はおおよそ2桁も向上した。従って、これらの本発明にかかる多層膜を用いれば、X線望遠鏡に用いる多層膜X線反射鏡として十分な性能を得ることができる。

【0027】なお、計算値のみならず、実際に作製した各多層膜の実測値においても、最上層厚を変化させない通常多層膜では、X線望遠鏡に用いる多層膜X線反射鏡として、30.4nmの除去比は大きかった（ピーク反射率19%、波長分解能28、除去比0.18）。一方、本発明にかかる最上層厚を最適化した多層膜を用いると、計算値のみならず実測値においても、X線望遠鏡に用いる多層膜X線反射鏡として十分な30.4nmの除去比が得られた。また、ピーク反射率及び波長分解能も最上層厚の最適化により低下しなかった（ピーク反射率18%、波長分解能30、除去比0.001）。

【0028】以下、実施例を通じて本発明をさらに詳しく説明するが、本発明はこの実施例にて限定されない。

【0029】

【実施例1】本実施例では、重原子層としてMo、軽原

子層としてSiを用いた。基板1には鏡面研磨した合成石英を用いた。MoとSiの各ターゲットを用いて、イオンビームスパッタリングにより、基板1上にMo層2とSi層3を交互に繰り返し積層して多層膜を作製した。

【0030】基板上の第1層をMo、第2層をSiとし、多層膜の周期長は6.7nm、 Γ は0.15、積層数は149.5ペアとした。更にこの上にSi層4を14.2nm成膜した。図1に、その断面図を示す（図中では多層膜の層数は、実際よりも少なく描いてある）。本実施例にかかるMo/Si多層膜（周期長6.7nm、 $\Gamma=0.15$ 、積層数149.5ペア、最上層（Si層）厚14.2nm）と、通常のMo/Si多層膜（周期長6.7nm、 $\Gamma=0.15$ 、積層数150ペア）の反射率を波長に対して描いた曲線（計算値）を図2に示す。

【0031】波長13.28nmにおける反射率は約60%、波長30.4nmにおける反射率は約0.015%であり、除去比は約0.00025である。また、作製した多層膜の垂直入射における軟X線反射率を放射光を用いて実測したところ、X線望遠鏡に用いる多層膜反射鏡として十分な反射特性が得られた（ピーク反射率50%、波長分解能45、除去比0.001）。

【0032】

【実施例2】本実施例では、重原子層としてMo、軽原子層としてSiを用いた。基板1には鏡面研磨した合成石英を用いた。MoとSiの各ターゲットを用いて、イオンビームスパッタリングにより、基板1上にMo層2とSi層3を交互に繰り返し積層して多層膜を作製した。

【0033】基板上の第1層をMo、第2層をSiとし、多層膜の周期長は8.8nm、 Γ は0.1、積層数は99.5ペアとした。更にこの上にSi層4を15.2nm成膜した。図1に、その断面図を示す（図中では多層膜の層数は、実際よりも少なく描いてある）。本実施例にかかるMo/Si多層膜（周期長8.8nm、 $\Gamma=0.1$ 、積層数99.5ペア、最上層（Si層）厚15.2nm）と、通常のMo/Si多層膜（周期長8.8nm、 $\Gamma=0.1$ 、積層数100ペア）の反射率を波長に対して描いた曲線（計算値）を図3に示す。

【0034】波長17.11nmにおける反射率は約42%、波長30.4nmにおける反射率は約0.015%であり、除去比は約0.00035である。また、作製した多層膜の垂直入射における軟X線反射率を放射光を用いて実測したところ、X線望遠鏡に用いる多層膜反射鏡として十分な反射特性が得られた（ピーク反射率36%、波長分解能35、除去比0.001）。

【0035】

【実施例3】本実施例では、重原子層としてMo、軽原子層としてSiを用いた。基板1には鏡面研磨した合成石英を用いた。MoとSiの各ターゲットを用いて、イ

オンビームスパッタリングにより、基板 1 上に Mo 層 2 と Si 層 3 を交互に繰り返し積層して多層膜を作製した。

【0036】基板上の第 1 層を Mo、第 2 層を Si とし、多層膜の周期長は 9.3nm、 Γ は 0.1、積層数は 99.5 ペアとした。更にこの上に Si 層 4 を 15.6nm 成膜した。図 1 に、その断面図を示す（図中では多層膜の層数は、実際よりも少なく描いてある）。本実施例にかかる Mo/Si 多層膜（周期長 9.3nm、 $\Gamma = 0.1$ 、積層数 99.5 ペア、最上層（Si 層）厚 15.6nm）と、通常の Mo/Si 多層膜（周期長 9.3nm、 $\Gamma = 0.1$ 、積層数 100 ペア）の反射率を波長に対して描いた曲線（計算値）を図 4 に示す。

【0037】波長 18.04nm における反射率は約 34%、波長 30.4nm における反射率は約 0.05% であり、除去比は約 0.0013 である。また、作製した多層膜の垂直入射における軟 X 線反射率を放射光を用いて実測したところ、X 線望遠鏡に用いる多層膜反射鏡として十分な反射特性が得られた（ピーク反射率 30%、波長分解能 40、除去比 0.002）。

【0038】

【実施例 4】本実施例では、重原子層として MoSi₂、軽原子層として Si を用いた。基板 1 には鏡面研磨した合成石英を用いた。MoSi₂ と Si の各ターゲットを用いて、イオンビームスパッタリングにより、基板 1 上に MoSi₂ 層 2 と Si 層 3 を交互に繰り返し積層して多層膜を作製した。

【0039】基板上の第 1 層を MoSi₂、第 2 層を Si とし、多層膜の周期長は 11.0nm、 Γ は 0.2、積層数は 59.5 ペアとした。更にこの上に Si 層 4 を 15.2nm 成膜した。図 1 に、その断面図を示す（図中では多層膜の層数は、実際よりも少なく描いてある）。本実施例にかかる MoSi₂/Si 多層膜（周期長 11.0nm、 $\Gamma = 0.2$ 、積層数 59.5 ペア、最上層（Si 層）厚 15.2nm）と、通常の MoSi₂/Si 多層膜（周期長 11.0nm、 $\Gamma = 0.2$ 、積層数 60 ペア）の反射率を波長に対して描いた曲線（計算値）を図 5 に示す。

【0040】波長 21.13nm における反射率は約 31%、波長 30.4nm における反射率は約 0.007% であり、除去比は約 0.0002 である。また、作製した多層膜の垂直入射における軟 X 線反射率を放射光を用いて実測したところ、X

線望遠鏡に用いる多層膜反射鏡として十分な反射特性が得られた（ピーク反射率 18%、波長分解能 30、除去比 0.001）。

【0041】

【発明の効果】以上のように、本発明にかかる多層膜 X 線反射鏡は、軟 X 線領域において（例えば、太陽からの X 線観測において重要な鉄の輝線スペクトルの 13.28nm (Fe XXII)、17.11nm (Fe IX)、18.04nm (Fe XI)、21.13nm (Fe XIV) の波長に対して)、反射率と波長分解能の両方を低下させずに 30.4nm の除去比を低下させることができる。

【0042】従って、本発明にかかる多層膜 X 線反射鏡を X 線望遠鏡に用いると、その性能を著しく向上させることができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明にかかる多層膜 X 線反射鏡（一例）の概略断面図である。

【図 2】本発明にかかるピーク波長 13.28nm 用の多層膜 X 線反射鏡（一例、Mo/Si の最上層厚を最適化したもの）と、従来の多層膜 X 線反射鏡（一例、Mo/Si）の分光反射率を比較した図である。

【図 3】本発明にかかるピーク波長 17.11nm 用の多層膜 X 線反射鏡（一例、Mo/Si の最上層厚を最適化したもの）と、従来の多層膜 X 線反射鏡（一例、Mo/Si）の分光反射率を比較した図である。

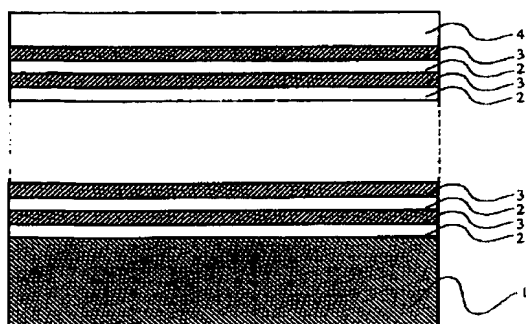
【図 4】本発明にかかるピーク波長 18.04nm 用の多層膜 X 線反射鏡（一例、Mo/Si の最上層厚を最適化したもの）と、従来の多層膜 X 線反射鏡（一例、Mo/Si）の分光反射率を比較した図である。

【図 5】本発明にかかるピーク波長 21.13nm 用の多層膜 X 線反射鏡（一例、MoSi₂/Si の最上層厚を最適化したもの）と、従来の多層膜 X 線反射鏡（一例、MoSi₂/Si）の分光反射率を比較した図である。

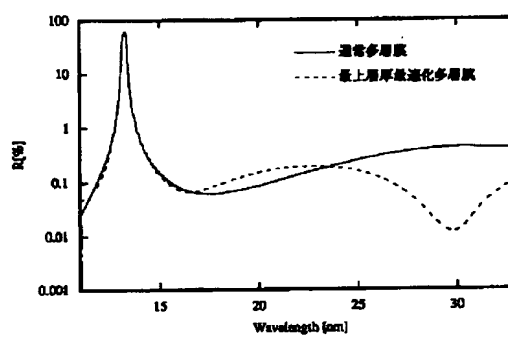
【主要部分の符号の説明】

- 1・・・基板
- 2・・・多層膜を構成する物質のうち、高屈折率物質で構成される層
- 3・・・多層膜を構成する物質のうち、低屈折率物質で構成される層
- 4・・・多層膜を構成する物質のうち、低吸収物質で構成される層
- 以上

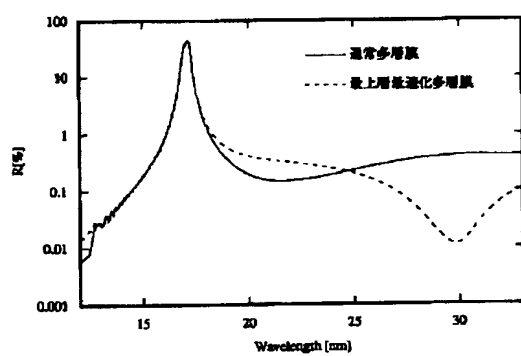
【図 1】



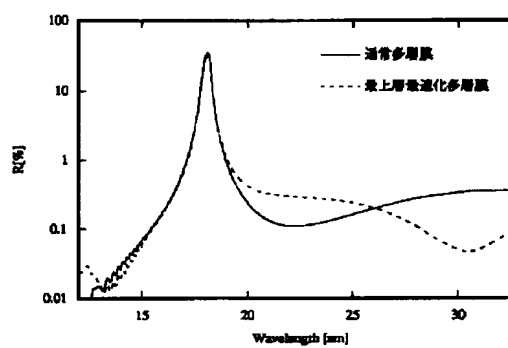
【図 2】



【図 3】



【図 4】



【図 5】

